

УДК 532.62.013.4

© 2004 г. С. В. АЛЕКСЕЕНКО, Д. М. МАРКОВИЧ, С. М. ХАРЛАМОВ, А. В. ЧЕРДАНЦЕВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

Методом локальной электропроводности измерены характеристики линейных возбужденных волн на поверхности стекающей пленки жидкости в присутствии со- или противонаправленного газового потока. Числа Рейнольдса жидкости и газа менялись в диапазоне от 24 до 125 и от 0 до 8000. Результаты представлены в форме дисперсионных соотношений, проведено сравнение с расчетом по линейной интегральной теории в случае отсутствия газового потока. Показано, что газовый поток повышает неустойчивость пленки и что противонаправленный поток газа сильнее влияет на фазовую скорость волн, чем спутный поток газа.

*Ключевые слова:* жидкая пленка, турбулентный газовый поток, линейные волны.

Совместное движение газа и пленки жидкости реализуется во многих аппаратах энергетики и химической технологии. Сильное влияние на протекание тепло- и массообмена оказывают волны, возникающие на межфазной поверхности, при этом известно, что турбулентный поток газа оказывает существенное воздействие на волновые характеристики пленочного течения.

Проблема устойчивости для свободно стекающих пленок изучена достаточно полно [1]. Эксперименты в такой постановке проводились в [2–4]. Несмотря на достаточно большой разброс экспериментально полученных данных, сделан вывод о том, что фазовая скорость и пространственный инкремент амплитуды растущих волн неплохо описываются линейными теориями волн максимального роста. В настоящее время основное внимание уделяется экспериментальному и теоретическому изучению различных видов вторичной неустойчивости волн на поверхности свободно стекающей пленки [5–7].

Совместное течение газа и пленки жидкости более сложно, и изучению устойчивости таких течений посвящены в основном теоретические работы [8–13]. Наличие потока газа над поверхностью жидкости приводит к появлению касательных и нормальных напряжений на межфазной поверхности, что оказывает существенное влияние на устойчивость пленки и характеристики возникающих волн. В [14–20] исследовались общие закономерности совместного горизонтального течения пленки жидкости и турбулентного потока воздуха. Были установлены различные волновые режимы течения и определены границы этих режимов, а также измерены параметры возникающих на поверхности жидкости волн (амплитуда, форма, длина и фазовая скорость). Во всех случаях исследовались естественно возникающие волны, которые не были строго периодическими, а представляли собой группы нелинейных двумерных или трехмерных волн с параметрами, флуктуирующими во времени и изменяющимися при удалении от места возникновения. Первые результаты экспериментального исследования вертикального совместного течения воздуха и пленки воды представлены в [21]. Выявлены и описаны различные режимы течения пленки. В отличие от горизонтального течения найдены режимы, в которых волны перемещаются в сторону, противоположную движению жидкости (при противоточном движении жидкости и газа). В [22] измерены

амплитуда, длина и фазовая скорость волн и получены зависимости этих характеристик от параметров течения.

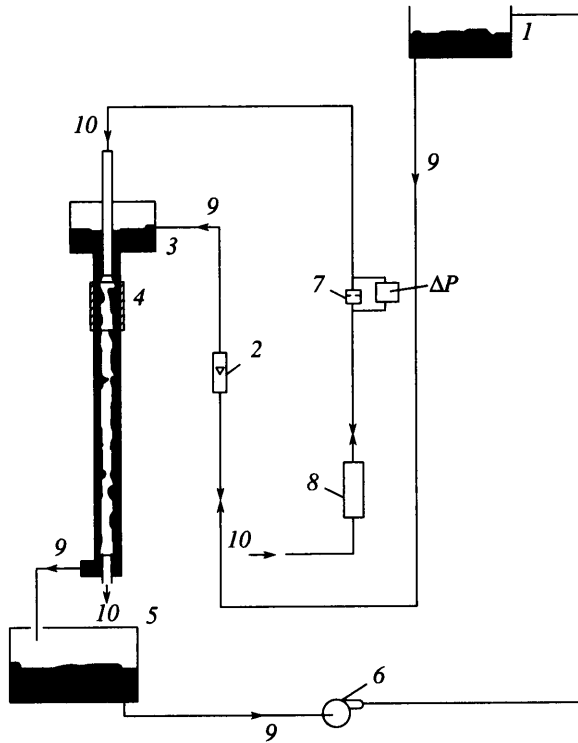
Несмотря на обилие экспериментальных данных, сравнение их с теорией имеет косвенный характер. Единственные параметры естественных волн, которые правомерно сравнивать с результатами линейной теории гидродинамической устойчивости, – это характерные значения длины волны и фазовой скорости в месте возникновения волн, получаемые, как правило, статистической обработкой экспериментальных данных. При таком подходе результаты, полученные на разных установках, сильно различаются, что затрудняет их сравнение с теорией. Кроме того, наблюдаемые двумерные естественные волны линейны только вблизи места их возникновения. По мере распространения они быстро становятся нелинейными или трехмерными. Измеренные характеристики естественных волн часто интерпретируют как соответствующие волнам максимального роста, что не всегда соответствует реальности.

Цель настоящей работы – получение экспериментальных данных для дисперсионных зависимостей фазовой скорости и пространственного инкремента и исследование влияния газового потока на волновые характеристики. Одной из причин существенного разброса экспериментальных данных при изучении линейно развивающихся волн на пленках, стекающих без обдува газом, является высокая чувствительность пленочного течения к внешним возмущениям, в частности к вибрациям техногенного характера. Уровень и частотный состав таких вибраций, как правило, претерпевают существенные изменения во времени и скорее всего различны для условий, в которых проводились эксперименты разных авторов. Наличие такого внешнего воздействия неизбежно приводит к разбросу экспериментальных данных при исследовании естественных волн. При изучении волн на пленке, стекающей в присутствии турбулентного газового потока, основным и гораздо более интенсивным источником хаотических возмущений являются турбулентные пульсации газа.

Для ослабления влияния указанных выше помех эксперименты проводились с возбуждением на пленке гармонических волн конечной амплитуды. Дополнительное преимущество такого подхода – то, что возбужденные волны – более удобный объект исследования для сравнения с теоретической моделью. Полученные экспериментальные зависимости фазовой скорости волны и пространственного инкремента от частоты возбуждения позволяют провести прямое сравнение этих данных с результатами расчетов.

**1. Описание установки и методика проведения измерений.** Измерение волновых характеристик проводилось для пленки, стекающей по внутренней поверхности вертикально установленной трубы из органического стекла (см. фиг. 1) с внутренним диаметром 15 мм и длиной 1 м. Пленка обдувалась воздухом, подведенным через редуктор и расходомер от линии сжатого воздуха и подаваемым внутрь либо через расположенную сверху и установленную соосно с оргстеклянной тонкостенную трубу из нержавеющей стали, либо через расположенную в нижней части и также соосно установленную трубу несколько меньшего, чем верхняя, диаметра. Внутренний диаметр верхней трубы, через которую осуществлялась подача газа для обдува пленки спутным потоком 13.4 мм, толщина стенки трубы 0.3 мм. Внутренний диаметр нижней трубы, через которую осуществлялась подача газа для создания противотока, 9 мм, а толщина стенки этой трубы 0.5 мм.

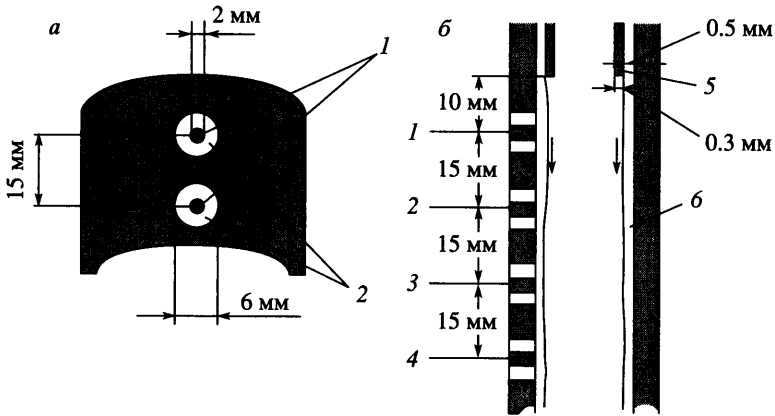
В качестве рабочих жидкостей использовались дистиллированная вода и водоглицериновый раствор различной вязкости с небольшим добавлением (0.1% по весу) NaCl. Жидкость подавалась из расположенного над рабочим участком питающего бака, проходила через ротаметр и успокоительную секцию, после чего попадала в рабочую область через кольцевой зазор, образованный между внешней поверхностью верхней трубы для подачи газа и внутренней поверхностью трубы из оргстекла. Ширина зазора 0.5 мм, длина 60 мм.



Фиг. 1. Схема установки: 1 – напорный бак, 2 – ротаметр, 3 – распределитель, 4 – датчики проводимости, 5 – приемный бак, 6 – насос, 7 – расходомерная шайба, 8 – редуктор и фильтр, 9 – жидкостная линия, 10 – газовая линия

Волны заданной частоты и амплитуды создавались при помощи установленной на входе в успокоительную секцию мембраны, которая приводилась в движение при помощи электродинамического вибратора, управляемого гармоническим сигналом, подаваемым от генератора сигналов низкой частоты. Характеристики волнового течения измерялись датчиками проводимости с вделанными заподлицо электродами. Датчики такого типа широко применяются для исследования пленочных течений [23, 24]. При проведении экспериментов осуществлялась четырехканальная запись толщины пленки с использованием датчиков проводимости с коаксиальным расположением электродов. Такая конфигурация позволяла упростить схему питания датчиков переменным током.

Устройство и взаимное расположение двух соседних датчиков показано на фиг. 2, а. На фиг. 2, б показан один из рабочих вариантов размещения датчиков. Все четыре датчика идентичны и имели следующие характеристики: диаметр центрального электрода 2 мм, ширина изолирующего зазора между центральным электродом и корпусом 2 мм, база между каналами (расстояние между центрами центральных электродов) 15 мм, частота питающего напряжения 10 кГц, полоса пропускания сигнала на выходе с демодулятора 0–1000 Гц. Сигнал с демодулятора подавался на встроенный в персональную ЭВМ многоканальный 12-разрядный АЦП, оцифровывался с частотой дискретизации 5 кГц и записывался на жесткий диск. Первичная калибровка датчиков проводилась путем создания в канале при помощи вставок кольцевых зазоров различ-



Фиг. 2. Конструкция и схема размещения датчиков проводимости: *a* – конструкция. 1 – центральные электроды, 2 – изолирующая прокладка, затененная часть – металл; *б* – расположение датчиков проводимости 1–4; 5 – труба для подачи газа, 6 – пленка жидкости

ной толщины. Сохранение калибровочной зависимости в процессе эксперимента проверялось путем периодических измерений толщины свободно стекающей пленки при нескольких фиксированных расходах жидкости. На фиг. 3 приведен пример двухканальной записи толщины пленки при фиксированном расходе жидкости и различных скоростях газового потока.

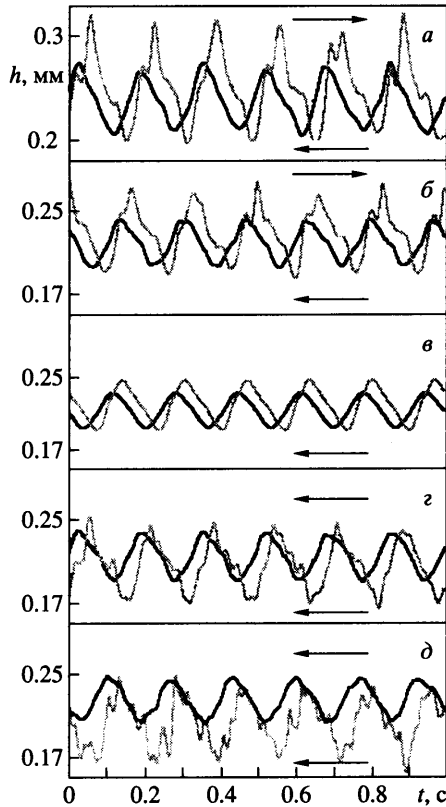
Обработка сигналов проводилась в спектральной области следующим образом. Для каждого из каналов вычислялись амплитуда  $A$  и фаза  $\varphi$  основной гармоники, после чего определялись безразмерная фазовая скорость и безразмерный пространственный инкремент амплитуды:

$$c = \frac{2\pi f x}{u_0(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad \alpha = \frac{h_0}{x} \ln \frac{A_2}{A_1}, \quad h_0 = \left( \frac{3\text{Re}v^2}{g} \right)^{1/3}, \quad u_0 = \frac{\text{Re}v}{h_0}$$

Здесь  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $A_1, A_2$  – фазы и амплитуды основной гармоники для двух соседних каналов,  $x$  – расстояние между соседними датчиками,  $f$  – частота возбуждаемой волны,  $h_0, u_0$  – толщина и среднерасходная скорость для гладкой пленки по Нуссельту,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{Re} = q/\nu$  – число Рейнольдса пленочного течения,  $q$  – объемный расход жидкости на единицу длины пленки.

Положение первого датчика выбиралось в соответствии с описанным ниже критерием попадания в область стабилизированного течения. В зависимости от числа  $\text{Re}$  пленочного течения первый датчик находился на расстоянии от 10 до 45 мм от выхода пленки из кольцевого зазора. Остальные датчики размещались на одной линии с шагом 15 мм вниз по течению пленки. Свойства жидкостей и исследованные режимы течения приведены в таблице. Отрицательные среднерасходные скорости газа  $V_g$  относятся к противоточному течению,  $\rho, \sigma$  – плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкостей.

Проведение экспериментов по исследованию характеристик линейно развивающихся волн осложняется небольшими пространственными размерами области, в которой возможны такие измерения. Эта область должна начинаться ниже зоны гидродинамической стабилизации пленочного течения и оканчиваться там, где развитие волн

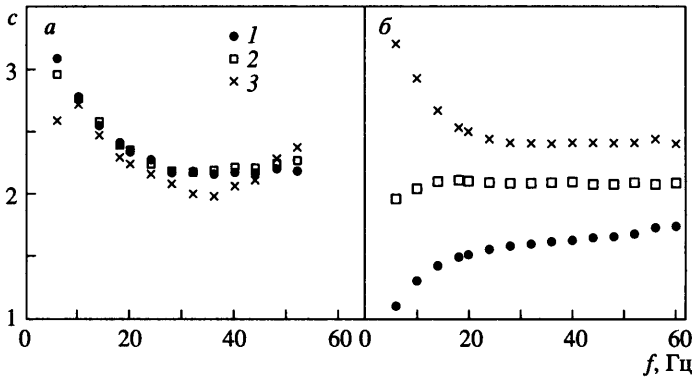


Фиг. 3. Пример двухканальной записи толщины пленки воды при различных скоростях газового потока при  $Re = 40$  и  $f = 6$  Гц, стрелками показано направление потоков газа и жидкости:  $a - V_g = -7.3$  м/с,  $б - -5.1$  м/с,  $в - 0$  м/с,  $г - 5.1$  м/с,  $д - 8$  м/с

становится существенно нелинейным. Само понятие длины зоны стабилизации нуждается в уточнении, поскольку обычно она определяется как расстояние от выхода из распределителя до места, где средние параметры течения, например толщина пленки, отличаются от равновесных на некоторую малую величину. Остается неясным, при каком уровне отклонения средней толщины пленки от равновесного значения такое отклонение уже не оказывает существенного влияния на волновые характеристики течения.

Попадание датчиков в область установившегося течения проверялось следующим образом. Фазовая скорость волны определялась для ряда частот на базах между датчиками 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4. Если построенные зависимости фазовой скорости от частоты

Жидкость	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma/\rho$ , см <sup>3</sup> /с <sup>2</sup>	$\nu \cdot 10^2$ , см <sup>2</sup> /с	Re	$V_g$ , м/с
Вода	1	72	1	24, 40	8, 5.1, 0, -5.1, -7.3
Водоглицериновый раствор	1.07	65	2.1	24, 40 105, 125	7.3, 5.1, 0, -5.1, -7.3 7.3, 5.1, 0, -5.1



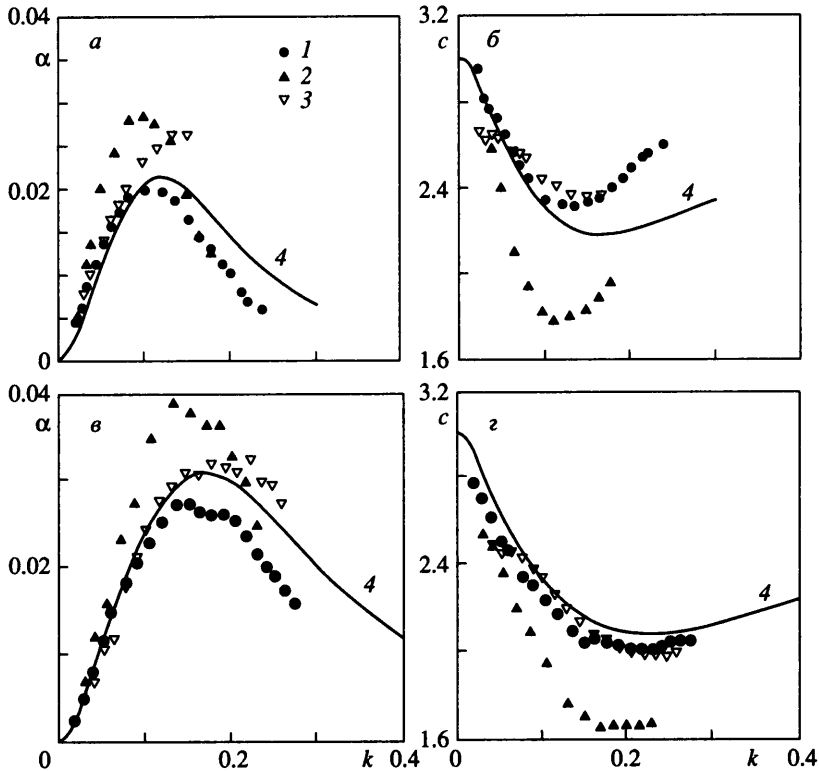
Фиг. 4. Зависимость фазовой скорости волн от частоты возбуждения на разных расстояниях от распределителя, вода: *a* –  $Re = 40$ , *б* –  $124$ . Точки 1 – датчики 1–2, 2 – датчики 2–3, 3 – датчики 3–4

совпадали хотя бы для двух соседних расстановок из пар датчиков (например, для пар 1–2 и 2–3), то эти датчики считались попавшими в область стабилизированного течения.

В качестве примера на фиг. 4 приведены зависимости фазовой скорости от частоты для трех указанных выше баз при двух разных расходах жидкости. Первый датчик располагался на расстоянии 10 мм от выхода из распределителя. Видно, что при  $Re = 40$  скорости, определенные на базах 1–2 и 2–3, хорошо совпадают и, следовательно, датчики 1, 2 и 3 можно считать попавшими в область установившегося течения. Для пары 3–4 наблюдается незначительное понижение скорости в полосе частот 28–40 Гц, что может быть объяснено началом проявления нелинейных эффектов, поскольку именно в этой области частот находятся волны максимального роста. На фиг. 4 б приведены такие же зависимости для пленочного течения воды при  $Re = 124$ . В этом случае нет оснований считать, что хотя бы одна из пар датчиков попала в зону стабилизированного течения, и, следовательно, датчики следует размещать на большем расстоянии от выхода из распределителя.

Поскольку в области неустойчивости развивающиеся волны достаточно быстро выходят на нелинейный режим, особое внимание уделялось выполнению условий, при которых вклад нелинейных эффектов мал по сравнению с точностью измерений. Волна считалась развивающейся как линейная, если ее пространственный инкремент и фазовая скорость не зависели от ее амплитуды при условии положительности пространственного инкремента. Поэтому измерения проводились при разных уровнях возбуждения волн, а при обработке, в зависимости от конкретных условий эксперимента, отбор проводился по одному или по двум следующим критериям. Волна считалась линейно развивающейся, если при положительном пространственном инкременте амплитуды значения инкремента и фазовой скорости совпадали для двух соседних расстановок из пар датчиков или если при положительном пространственном инкременте его значение и значение фазовой скорости не зависели от амплитуды возбужденной волны для той из расстановок, на которой проводились измерения.

Применение этих критериев приводит к ограничению уровня возбуждения волн сверху. Ограничение уровня возбуждения снизу связано с необходимостью обеспечить достаточно высокое значение отношения сигнал/шум. Выбранный в эксперименте порог этого отношения обеспечивал измерение пространственного инкремента амплитуды с погрешностью не более 8%, а фазовой скорости – не более 3% при максимальных скоростях газового потока практически для всех частот возбуждения. Для пленочного

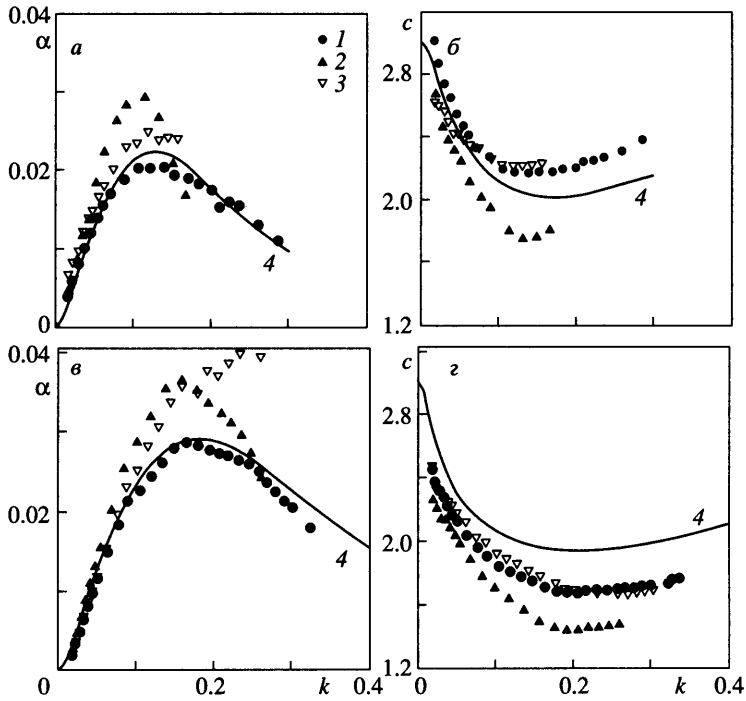


Фиг. 5. Пространственный инкремент амплитуды и фазовая скорость волн в зависимости от волнового числа при  $Re = 24$ : а, б – вода: 1 –  $V_g = 0$  м/с, 2 –  $-7.3$  м/с, 3 –  $8$  м/с, 4 – расчет без потока газа; в, г – водоглицериновый раствор: 1 –  $V_g = 0$  м/с, 2 –  $-7.3$  м/с, 3 –  $7.3$  м/с, 4 – расчет без потока газа

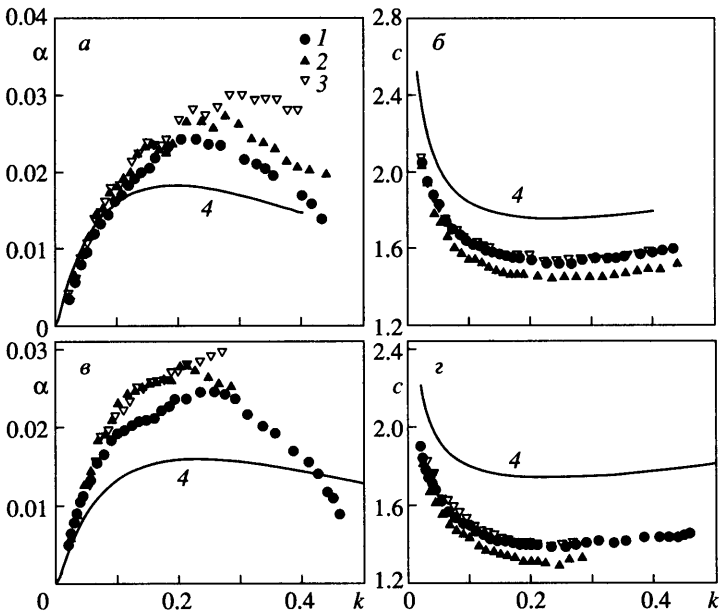
течения в отсутствие газового потока максимальная погрешность не превышала соответственно 4 и 2%.

**2. Результаты измерений.** На фиг. 5–7 результаты измерений волновых характеристик пленочного течения представлены в виде зависимостей  $c(k)$  и  $\alpha(k)$ , где  $k = 2\pi h_0/\lambda$  безразмерное волновое число, построенное по равновесной толщине гладкой пленки в отсутствие течения газа,  $\lambda$  – длина волны. Экспериментальные точки для промежуточных значений скорости обдува ( $-5.1$  и  $5.1$  м/с) не приведены, поскольку во всех случаях они занимают положение, указывающее на плавность перехода представляемых величин от значений, измеренных без обдува газом, к крайним значениям. Для чисел  $Re > 70$  максимальная скорость газа при противотоке  $-5.1$  м/с, поскольку при  $V_g = -7.3$  м/с начинался переход к захлебыванию. На этих же фигурах представлены дисперсионные кривые для течения без обдува, рассчитанные по линейной интегральной теории [1]. Для течения пленки без обдува теоретические и экспериментальные кривые наиболее близки при  $Re < 70$ . Основное различие между теорией и экспериментом наблюдается на высоких частотах, где экспериментально измеренные значения инкремента существенно ниже теоретических.

Согласие результатов эксперимента и теории для безобдывного течения при умеренных числах  $Re$  позволило применить интегральную теорию для оценки влияния кривизны стенки экспериментального канала на дисперсионные характеристики

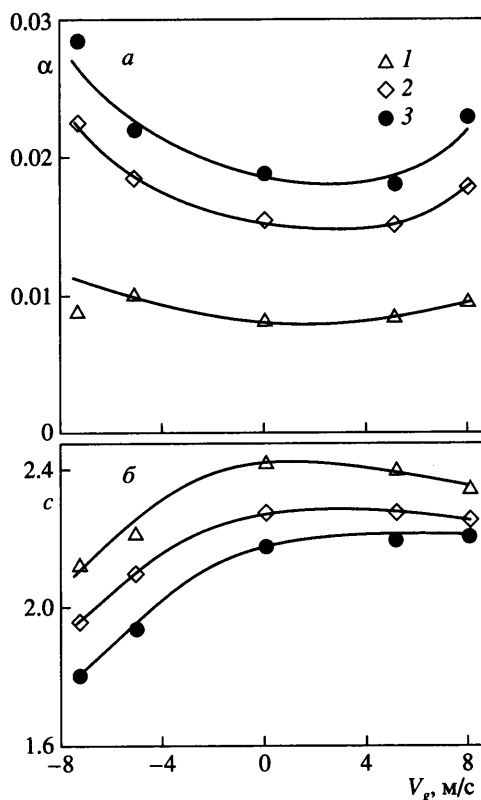


Фиг. 6. Пространственный инкремент амплитуды и фазовая скорость волн в зависимости от волнового числа при  $Re = 40$ : а, б – вода: 1 –  $V_g = 0$  м/с, 2 –  $-7.3$  м/с, 3 –  $8$  м/с, 4 – расчет без потока газа; в, г – водоглицериновый раствор: 1 –  $V_g = 0$  м/с, 2 –  $-7.3$  м/с, 3 –  $7.3$  м/с, 4 – расчет без потока газа



Фиг. 7. Пространственный инкремент амплитуды и фазовая скорость волн в зависимости от волнового числа в водоглицериновом растворе: а, б –  $Re = 105$ ; в, г –  $Re = 125$ : 1 –  $V_g = 0$  м/с, 2 –  $-5.1$  м/с, 3 –  $7.3$  м/с, 4 – расчет без потока газа





Фиг. 8. Зависимость пространственного инкремента амплитуды (а) и фазовой скорости волн (б) в воде от скорости газа при  $Re = 40$ : 1 –  $k = 0.06$ , 2 –  $0.09$ , 3 –  $0.12$

волн. Оценки показали, что наличие кривизны должно приводить к уменьшению инкремента и увеличению фазовой скорости волн по сравнению с течением на пластине, однако для использованного в экспериментах канала величина этих отклонений существенно меньше, чем погрешность измерений, что позволяет отнести полученные результаты к двумерным плоским волнам.

При наличии газового потока для всех представленных режимов в эксперименте четко прослеживаются следующие закономерности: при любом направлении газового потока наблюдается область частот, в которой инкремент амплитуды возрастает по сравнению со значениями, характеризующими волновое течение без обдува. При этом противоток газа оказывает несколько более ярко выраженное влияние на волновые характеристики, чем спутный поток газа. Характер зависимостей  $\alpha(k)$  позволяет предположить, что в условиях противотока увеличение инкрементов сопровождается сужением области длин волн, для которых течение неустойчиво, при этом значение  $k$  для волн максимального роста оказывается достаточно консервативной величиной. Наличие спутного потока наряду с увеличением инкрементов приводит к расширению области неустойчивости, при этом значение  $k$  для волн максимального роста возрастает с увеличением скорости обдува. Фазовая скорость волн, особенно в области волн максимального роста, весьма чувствительна к скорости противотока газа и быстро уменьшается с увеличением скорости газа. Влияние спутного течения газа на фазовую скорость волн выражено слабо и приводит к тому, что в области волн максимального роста фа-

зоявая скорость слабо возрастает при увеличении скорости газа. В качестве примера, иллюстрирующего описанные тенденции, на фиг. 8 приведены зависимости фазовой скорости и пространственного инкремента от скорости газового потока при фиксированном расходе жидкости для ряда значений волнового числа.

**Заключение.** Получены экспериментальные данные по развитию двумерных линейных волн на вертикальной пленке жидкости в присутствии газового потока. При помощи метода локальной электропроводности в широком диапазоне параметров измерены пространственные инкременты амплитуды и фазовые скорости возбужденных волн.

Наличие как сонаправленного, так и противонаправленного газовых потоков приводит к увеличению инкрементов амплитуды. Фазовая скорость в существенно большей степени чувствительна к противотоку газа. Спутный поток газа усиливает смещение максимума инкремента в сторону больших значений волнового числа. В случае отсутствия газового потока линейная интегральная теория адекватно описывает течение пленки при  $Re < 70$  в области значений  $k < 0.25$ .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 03-02-16695-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск.: Наука, 1992. 255 с.
2. Krantz W.B., Goren S.L. Stability of thin liquid films flowing down a plane // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1971. V. 10. № 1. P. 91–101.
3. Pierson F.W., Whitaker S. Some theoretical and experimental observations of the wave structure of falling liquid films // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1977. V. 16. № 4. P. 401–408.
4. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волны на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости. Препринт № 36-79. Новосибирск.: Ин-т теплофизики СО АН СССР. 1979. 51 с.
5. Liu J., Paul J. D., Gollub J.P. Measurement of the primary instabilities of film flow // *J. Fluid Mech.* 1993. V. 250. P. 69–101.
6. Cheng M., Chang H.-C. Competition between subharmonic and sideband secondary instabilities on a falling film // *Phys. Fluids.* 1995. V. 7. № 1. P. 34–54.
7. Liu J., Schneider J.B., Gollub J.P. Three-dimensional instabilities of film flow // *Phys. Fluids.* 1995. V. 7. № 1. P. 55–67.
8. Гугучкин В.В., Демехин Е.А., Калугин Г.Н., Маркович Э.Э., Пикин В.Г. О линейной и нелинейной устойчивости совместного плоскопараллельного течения пленки жидкости и газа // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1979. № 1. С. 36–42.
9. Чан Ван Чан, Шкадов В.Я. Неустойчивость слоя вязкой жидкости под воздействием граничного потока газа // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1979. № 2. С. 28–36.
10. Jurman L.A., McCready M. J. Study of waves on thin liquid films sheared by turbulent gas flows // *Phys. Fluids A.* 1989. V. 1. № 3. P. 522–536.
11. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 1995. V. 38. № 11. P. 2127–2134.
12. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Interfacial instabilities in an annular two-phase flow // *Russ. J. Eng. Thermophys.* 1996. V. 6. № 4. P. 307–320.
13. Демехин Е.А., Токарев Г.Ю., Шкадов В.Я. Неустойчивость и нелинейные волны в вертикальной пленке жидкости, текущей в противотоке с турбулентным газовым потоком // *Теорет. основы хим. технол.* 1989. Т. 23. № 1. С. 64–70.
14. Rossum J.J. Experimental investigation of horizontal liquid films: wave formation, atomization, film thickness // *Chem. Eng. Sci.* 1959. V. 11. № 1. P. 35–52.
15. Lilleleht L.U., Hanratty T. J. Measurement of interfacial structure for co-current air-water flow // *J. Fluid Mech.* 1961. V. 11. Pt 1. P. 65–81.
16. Smith T. N., Tait R. W. F. Interfacial shear stress and momentum transfer in horizontal gas-liquid flow // *Chem. Eng. Sci.* 1966. V. 21. № 1. P. 63–75.

17. *Hanratty T.J., Engen J.M.* Interaction between a turbulent air stream and moving water surface // *AIChE Journal*. 1957. V. 3. № 3. P. 299–304.
18. *Cohen L.S., Hanratty T.J.* Effect of waves at a gas-liquid interface on a turbulent air flow // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 31. Pt 3. P. 467–479.
19. *Craik A. D. D.* Wind-generated waves in liquid films // *J. Fluid Mech.* 1966. V. 26. Pt 2. P. 369–392.
20. *Гузочкин В.В., Демехин Е.А., Калугин Г.Н., Маркович Э.Э., Пикин В.Г.* Волновое движение пленок жидкости, текущих совместно с газовым потоком // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1975. № 4. С. 174–177.
21. *Семенов П.А.* Течение жидкости в тонких слоях // *Журн. техн. физики*. 1944. Т. 14. № 7–8. С. 427–437.
22. *Stainthorp F. P., Batt R.S.W.* The effect of co-current and counter-current air flow on the wave properties of falling liquid films // *Trans. Inst. Chem. Eng.* 1967. V. 45. № 9. P. 372–382.
23. *Chu K.J., Dukler A.E.* Statistical characteristics of thin, wavy films pt 2 // *AIChE Journal*. 1974. V. 20. № 4. P. 695–706.
24. *Беседин С. М.* Экспериментальные методы исследования волнового течения тонких пленок жидкости // *Физическая гидродинамика и теплообмен*. Новосибирск.: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1978. С. 17–21.

Новосибирск

Поступила в редакцию  
17.Ш.2003